

Técnicas de evaluación no destructiva para recipientes a presión fabricados en material compuesto

Non-destructive evaluation techniques for pressure vessels made of composite material

C. Rodrigo Romero Rosero ¹, Guillermo Cosarinsky ¹, Juan M. Iriarte ¹
Jose Brizuela ², Ezequiel Poodts ³, M. Fernanda Ruiz Gale ¹

¹ Comisión Nacional de Energía Atómica, Centro Atómico Constituyentes (CNEA) – Departamento de Ensayos No Destructivos y Estructurales (ENDE), Avda. General Paz 1499, CP 1650, San Martín - Buenos Aires, Argentina.

e-mail: romero@cnea.gov.ar

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET - CNEA), Avda. General Paz 1499, CP 1650, San Martín - Buenos Aires, Argentina.

³ Kohlenia - Materiales Compuestos, Carlos Tejedor 2576, CP 1610, Ricardo Rojas – Buenos Aires, Argentina

e-mail: josebrizuela@conicet.gov.ar, ruizmf@cnea.gov.ar

RESUMEN

Los recipientes fabricados en materiales compuestos COPVs (Composite Overwrapped Pressure Vessels) son extensamente aplicados en la industria aeroespacial para contener líquidos a alta presión debido a sus elevadas propiedades mecánicas, además de ser un componente muy liviano. Consisten en una delgada estructura metálica (contenedor o liner) recubierta por un compuesto plástico, reforzado con fibras estructurales de carbono. Un aspecto importante en el marco del desarrollo de estos componentes, es el aseguramiento de la calidad de los recipientes una vez completado el proceso de fabricación. Este trabajo aborda la inspección de un COPV de forma cilíndrica de 100 litros de capacidad con liner de aluminio. Para ello se emplean dos técnicas de ensayos no destructivos: ultrasonido acoplado en aire y shearografía. Ambas técnicas fueron adaptadas específicamente para este tipo de recipiente y montadas sobre un escáner experimental que proporciona soporte y repetitividad a los ensayos, garantizando resultados cualitativos en la inspección de estos componentes. Los resultados que se obtuvieron con las dos técnicas se comparan y se observa un acuerdo entre ellos en lo que concierne a la calidad del proceso de fabricación del componente. A partir de los ensayos efectuados y de sus resultados se realizaron aportes y recomendaciones para una posible mejora del proceso de fabricación.

Palabras clave: industria aeroespacial, materiales compuestos, ultrasonido acoplado en aire, shearografía.

ABSTRACT

Composite Overwrapped Pressure Vessels (COPV) are extensively applied in the aerospace industry to contain high pressure liquids due to their elevated mechanical properties as well as being a lightweight component. They consist of a thin metallic structure (liner) wrapped by a plastic compound, reinforced with structural carbon fibers. An important aspect in the development of COPVs is the quality assurance once the manufacturing process has been completed. This work aims to the inspection of a cylindrical-aluminum-liner COPV of 100 liters of capacity. For this purpose, two non-destructive testing techniques were applied: air-coupled ultrasound and shearography. Both techniques were specifically adapted to the COPV geometry and mounted on an experimental scanner that provides support and repetitiveness to the tests. This mechanical arrangement guarantees qualitative results in the COPVs inspection. The obtained results with both techniques were compared and they show good agreement regarding the quality of the manufacturing process. Based on the tests carried out and their results, contributions and recommendations were made for a possible improvement of the manufacturing process.

Keywords: aerospace industry, composite materials, ultrasonic testing air coupled, shearography

1. INTRODUCCIÓN

Los recipientes desarrollados en compuestos COPVs son utilizados ampliamente en la industria aeroespacial

[1] para contener líquidos a alta presión. Los COPV (abreviatura que proviene del inglés Composite Overwrapped Pressure Vessels) consisten en una delgada estructura metálica (contenedor metálico comúnmente conocido como liner) recubierta por un compuesto plástico, reforzado con fibras estructurales de carbono. La función principal del liner es evitar el contacto directo entre el compuesto y los agentes químicos que pueden degradar la matriz de la resina. Los COPVs se construyen bobinando sobre el núcleo metálico fibras de carbono impregnadas de resina, proceso conocido como filament winding. El componente se cura en horno para lograr una correcta polimerización de la matriz plástica.

Una de las metodologías disponibles para la Evaluación No Destructiva (END) de materiales compuestos que sobresale es la tecnología de Ultrasonidos Acoplados en Aire (UTAA) [2-4]. A diferencia del ultrasonido convencional, el método de UTAA no requiere un gel acoplante para transmitir la energía acústica dentro del medio material. Esta tecnología se basa en transductores eficientes, que tienen su capa de adaptación acústica ajustada a la impedancia del aire para asegurar una alta sensibilidad y proporcionar una adecuada relación señal-ruido [5]. Una de las configuraciones posibles para evaluar el componente mediante UTAA es la de transmisión-recepción. Sin embargo, el montaje es complejo ya que se requiere acceder al interior del tanque con uno de los sensores, y que ambos sensores estén alineados con la dirección radial del componente. En esta configuración, el ultrasonido pasa a través del espesor de la muestra, haciendo posible evaluar la falta de homogeneidad del material comparando la energía acústica emitida y recibida. Si existen defectos (es decir, delaminación, desuniones, etc.) en la trayectoria del haz, la señal recibida disminuye debido a la reflexión sobre los obstáculos. La atenuación de la señal puede ser parcial o total (pérdida de transmisión) dependiendo del tamaño y tipo del defecto. Otra técnica posible es la configuración *pitch – catch*, la cual tiene la ventaja que se puede aplicar desde el lado exterior del componente, con ambos sensores con incidencia oblicua sobre el componente, generando ondas guiadas. Si bien esta técnica revela información de la orientación de las fibras y el proceso de curado, presenta señales más ruidosas, debido a que la trayectoria del sonido en las fibras es más larga que en transmisión, además las ondas guiadas son sensibles a la anisotropía del material [6]. Si bien ambas técnicas dan información cualitativa del estado del componente y pueden ser complementarias, se seleccionó la de transmisión-recepción.

Por otro lado la Shearografía digital es un método interferométrico que permite la medición de gradientes de deformación fuera del plano [7-11]. Este método emplea luz láser para realizar la medición, siendo un método con elevada sensibilidad. Entre algunas de sus ventajas tenemos que es un método de campo completo, sin contacto, poco susceptible a las vibraciones y a los movimientos de cuerpo rígido. La shearografía se puede aplicar tanto a materiales simples como a compuestos. Este método requiere de un sistema óptico sencillo para hacer interferir la luz proveniente de una superficie iluminada. Para esto se utiliza, en este trabajo, un interferómetro de Michelson. Al iluminar el objeto con luz coherente como la de un láser, se observa sobre su superficie un patrón granulado, fenómeno conocido como speckle, que es el portador de la información. La shearografía se basa en la comparación de dos estados, uno de referencia y otro estado final o deformado. En el primero no hay deformación alguna y en el segundo se somete a la muestra a alguna tensión que le genere deformación, como, por ejemplo, aplicando presión, una fuerza o temperatura. Las deformaciones ponen en evidencia posibles defectos como delaminaciones, golpes, fracturas, despegues o comportamientos anómalos al resto del material. Como resultado se obtiene un interferograma en el que se observan franjas oscuras y claras, que se conoce como mapa de franjas de fases y contiene información de la deformación de la superficie [12].

Dado que este trabajo surge del interés del fabricante del componente, ambos métodos fueron estudiados para emplearlos sobre una posible línea de producción para garantizar el correcto proceso de fabricación. Por lo tanto, la shearografía permitiría evaluar rápidamente el estado del componente de forma preliminar y posteriormente, en caso de ser necesario, se utilizaría el método de ultrasonido como una herramienta de ensayo más exhaustivo para ubicar y dimensionar el defecto.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Características del componente

Los COPVs a inspeccionar son de forma cilíndrica en la parte central y semiesférica en ambos extremos, tienen una capacidad de 100 litros y un liner de aluminio. Su longitud total es de 1100mm, con un diámetro exterior de 394mm, y un espesor de pared total de 8mm, de los cuales 5mm corresponden al espesor de bobinado y el restante a la pared del liner. El componente se fabricó como pieza patrón, e incluye una serie de defectos inducidos tales como: despegues, delaminaciones, inclusiones e impactos de baja velocidad. Estos se encuentran ubicados en distintas posiciones a lo largo de la parte cilíndrica del tanque como se esquematiza en la Figura 1.

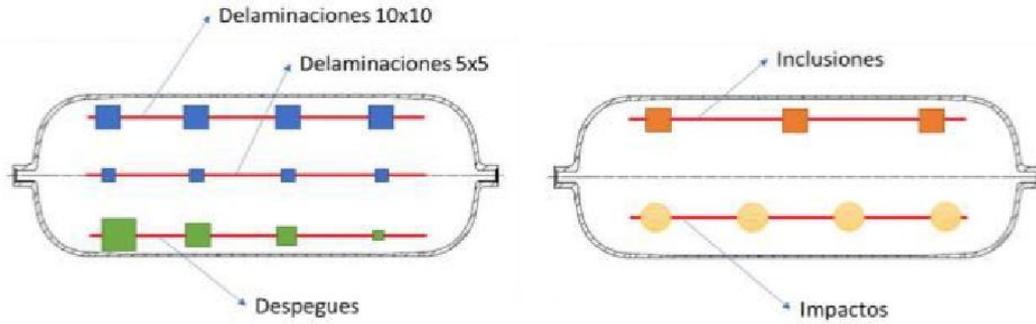


Figura 1. Diagrama de defectos incorporados en el COPV cilíndrico utilizado para la experimentación en laboratorio

2.2 Método de Ultrasonido acoplado en aire

Se diseñó una bancada de experimentación tal como se muestra en la Figura 2, que permite girar libremente el tanque alrededor de su eje longitudinal. El movimiento de rotación está instrumentado para conocer en todo momento el ángulo de giro y facilitar el sincronismo de la captura de datos. Por otro lado, se incorporó un sistema de traslación lineal con una excursión máxima de 300mm, que permite mantener alineados la pareja de transductores sobre la dirección radial del cilindro. Además, la guía que sostiene al transductor interno (TxR) posee una articulación que permite ingresar y luego posicionar al sensor sobre la dirección radial del cilindro. El guiado de los transductores está motorizado y avanza sobre un tornillo sin fin, logrando resoluciones de barrido muy pequeñas. Este prototipo no considera la inspección de las zonas esféricas del tanque.

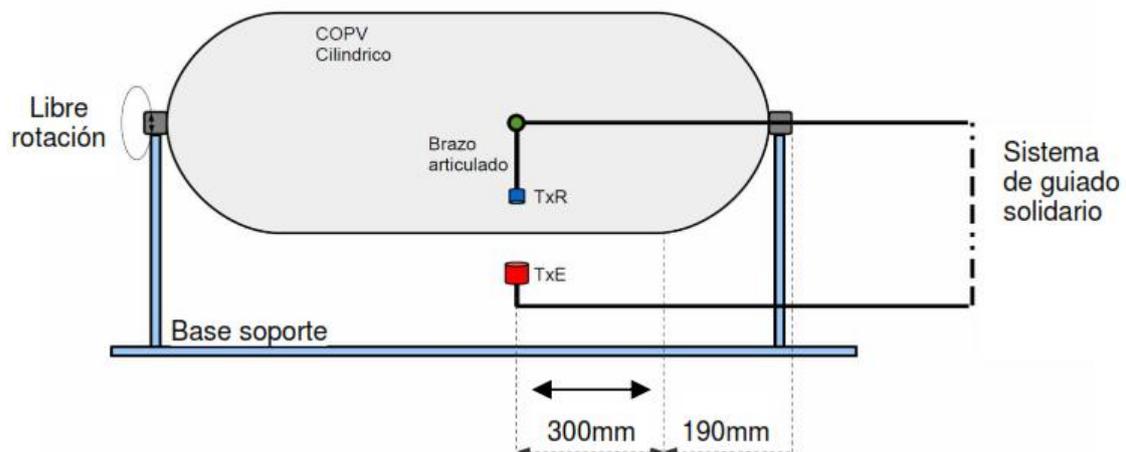


Figura 2. Esquema del sistema diseñado para la inspección del tanque cilíndrico

El ensayo por UTAA consiste en atravesar la pared del cilindro con un haz de incidencia normal a la superficie, utilizando un par transductores enfrentados y alineados. Cerca de la pared exterior del cilindro se ubica el emisor (TxE), mientras que por el interior el receptor (TxR), tal como se indica en la Figura 2. La pareja de transductores es de 250 KHz, el transmisor con un diámetro de 30mm y el receptor con uno de 20mm. La distancia entre ellos es de aproximadamente 30 mm. La configuración en transmisión permite evaluar la falta de homogeneidad en la pieza midiendo la energía acústica que se recibe en comparación a la emitida. Así, en presencia de un defecto (delaminación, porosidad, falta de adherencia, etc.) la intensidad de las señales captadas por el receptor disminuye a causa de la reflexión en el obstáculo. La pérdida de señal puede ser total o parcial dependiendo del tamaño del defecto, en relación al ancho del haz ultrasónico.

2.3 Método de Shearografía

En la Figura 3A se puede ver un esquema del dispositivo que se utiliza en este método. El componente principal es un interferómetro de Michelson, que está compuesto por un cubo divisor de haz, dos espejos enfrentados al cubo (E1 y E2), uno paralelo a la cara del cubo y otro con una ligera inclinación respecto a la cara del cubo. Para iluminar una región del componente que se quiere estudiar se utiliza un láser He-Ne, el cual se filtra y se expande mediante un pinhole de 5µm y una lente objetivo de 40x. Se observa con una cámara

CCD a través del interferómetro de Michelson la superficie iluminada con el láser. La imagen de la superficie pasa por el cubo divisor de haz, se refleja en ambos espejos y vuelve a pasar por el cubo de manera que ambas imágenes llegan al sensor de la cámara CCD; la imagen que se observa es la reflejada por los espejos y superpuesta pero desplazada lateralmente (δx) debido a la inclinación de uno de los espejos (E2). Se registra esta doble imagen de la superficie inicialmente sin deformar y luego se registra otra doble imagen de la superficie deformada. La adquisición se guarda en una PC para luego realizar el procesamiento de las imágenes.

Con el dispositivo de shearografía se capturan zonas de aproximadamente 300 mm x 400 mm. Primero en estado de reposo (sin deformación), luego deformando el tanque al aplicar una presión interna de 2 Bar. Asimismo, para lograr mayor contraste de la luz coherente roja sobre el tanque y mejorar la información de la figura del speckle capturada, se prepara la superficie aplicando una capa de polvo blanco, que es el utilizado como revelador en la técnica de líquidos penetrantes, ver Figura 3B. Cabe mencionar que el tiempo de evaluación del componente es corto (20 minutos aproximadamente) comparado con el de ultrasonido en aire (alrededor de 45 minutos), sin embargo el tiempo de preparación puede ser un limitante, sumado a la factibilidad de la aplicación del polvo revelador.

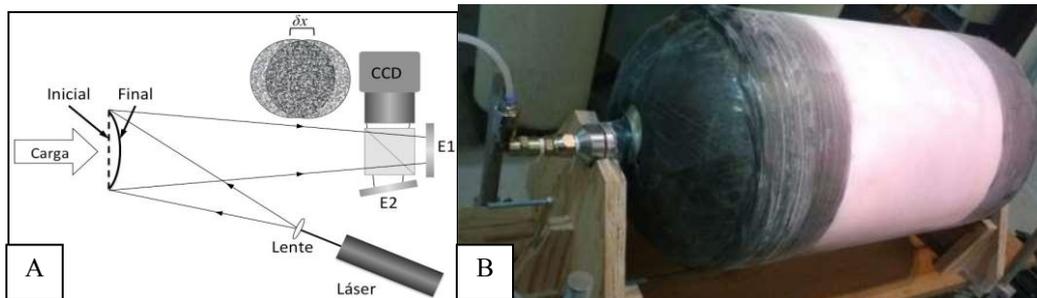


Figura 3. A: Esquema del método de Shearografía [13]. **B:** COPV con polvo revelador en el método de shearografía.

3. RESULTADOS

Las secciones inspeccionadas del tanque por el método de UTAA, son de 300mm de largo y se ubican en los extremos, tal como se indica en la Figura 2. La información obtenida se muestra en una imagen C-Scan representada en una escala lineal de amplitud de señales rectificadas en la Figura 4. El eje de ordenadas de la imagen es el desplazamiento axial de la pareja de transductores, mientras que en el eje de abscisas se indica la rotación del tanque expresada en grados (0 a 360°). Tal como se observa entre las dos secciones exploradas queda una franja de 120 mm de longitud ubicada en la parte media del tanque que no puede ser alcanzada por el sistema de guiado. En la imagen se destacan dos zonas marcadas en color rojo.

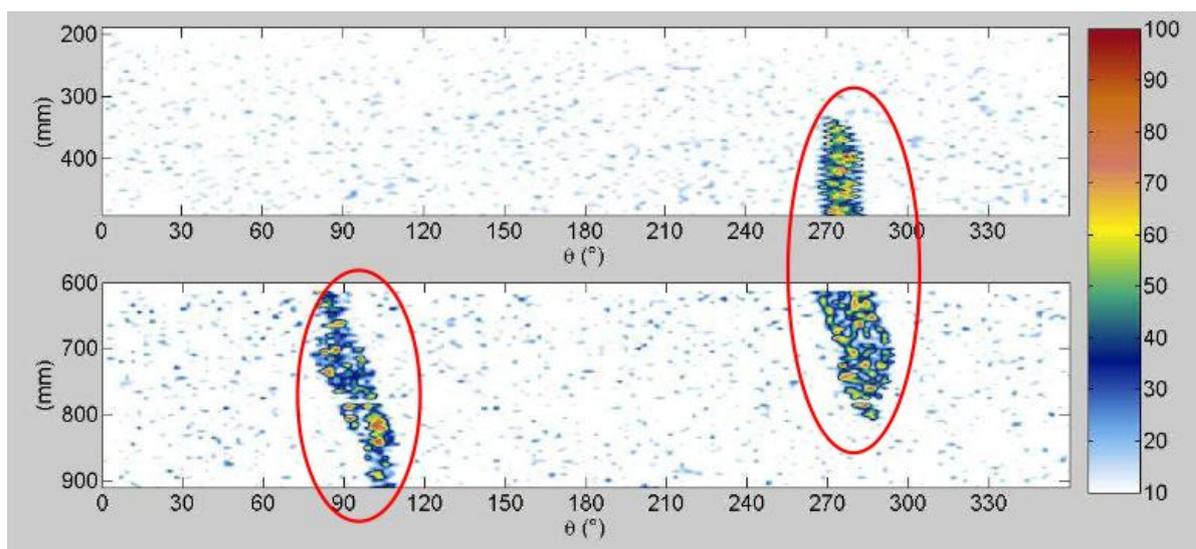


Figura 4. Imagen C-Scan de las dos secciones exploradas por el tanque. Se observan dos regiones donde la intensidad de la señal es alta.

Los resultados que se obtuvieron con la técnica de ultrasonido acoplado en aire se contrastaron con los de shearografía. Acoplando los distintos interferogramas que se obtienen por shearografía, se consigue un mapeo de la superficie cilíndrica del tanque, que se muestra en la Figura 5. Los distintos niveles de grises en la imagen se deben a los diferentes rangos dinámicos de los fotogramas capturados; el rango dinámico se refiere a los distintos estados de deformación captados para distintos instantes de tiempo en las distintas zonas del tanque. No obstante, se destacan dos zonas marcadas en color rojo que coinciden con la posición determinada por el método de UTAA.

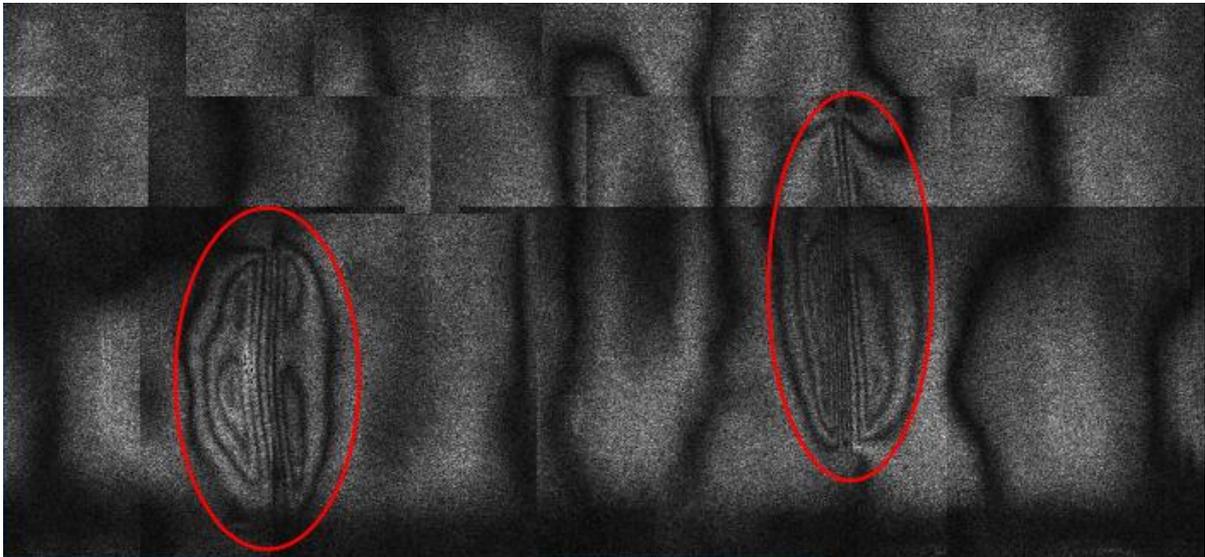


Figura 5: Mapa de la superficie del tanque obtenido por el método de shearografía. La ubicación de los patrones de franjas coincide con la posición de las zonas de alta intensidad encontradas por ultrasonido.

4. DISCUSIÓN

En las zonas resaltadas de la imagen C-Scan de ultrasonido, ver Figura 4, se observan solo dos secciones con buena adherencia. Estas se corresponden con las regiones en donde las señales acústicas pueden atravesar la pared del tanque (liner + laminado) y llegar al transductor receptor. Es decir, que en las áreas resaltadas el liner de aluminio y el laminado están adheridos. En el resto de la superficie explorada la energía ultrasónica transmitida es reflejada casi en su totalidad dentro de la pared del tanque. Por lo tanto, se pone de manifiesto que el liner y el laminado no están bien adheridos en gran parte del componente. Esta situación impide analizar e identificar el resto de los defectos artificiales que se han dispuesto en el laminado.

Al contrario de lo que se pretendía esperar con el método de shearografía, en donde un patrón de franjas indica un defecto, aquí sucede todo lo contrario, señalan la región de pegado entre el liner y el laminado. En efecto, cuando se deforma el tanque con una pequeña presión, solamente las regiones bien adheridas muestran un comportamiento diferente al resto del componente. Es decir, la mayor parte del componente, la despegada del liner, se desplaza según la deformación del cuerpo rígido, mientras que las regiones adheridas quedan restringidas para acompañar dicho movimiento, comportándose como si fueran una deformación fuera del plano. Por lo tanto, estas franjas coinciden con la posición de las zonas de buena adherencia encontradas por ultrasonido, dando sustento a los resultados obtenidos.

A partir de los resultados que se obtuvieron en este estudio, junto a otros realizados de forma preliminar [6], se puede inferir que los dos métodos abordados nos dan información coherente y aceptable acerca de la adherencia del proceso de fabricación actual. No obstante, ni la shearografía, a pesar de que estudia el speckle sobre la superficie, que a su vez contiene información de la deformación interna del material, ni el ultrasonido en aire empleando la técnica de transmisión, en donde la información recibida es la intensidad de la señal que se propaga por el espesor del material, pueden determinar la profundidad del defecto. Sin embargo, por el tipo de componente y su criticidad, la información de profundidad no es relevante ante una eventual reparación. Por otra parte para poder detectar los defectos artificiales con ambas técnicas, es necesario que el laminado este correctamente adherido al liner. Es por ello que se espera tener más componentes a ensayar para continuar su análisis y eventualmente evaluar si existe un método que sea más adecuado considerando todos los factores involucrados, resultados de ensayos, resolución, tiempos de inspección, factibilidad, entre otros. También creemos importante analizar si alguno de los dos métodos utilizados pueda detectar el

caso extremo de que el laminado no esté adherido al liner en su totalidad.

5. CONCLUSIONES

Tanto la técnica de Ultrasonidos Acoplado en Aire como la de Shearografía revelaron información cualitativa del estado del componente, mostrando una concordancia entre ambos resultados. Sin embargo debido al malogrado proceso de fabricación no fue posible con ninguna de las dos técnicas detectar la presencia de los defectos artificiales que se habían realizado en el componente. A partir de estos resultados se recomendó al fabricante una revisión del procedimiento de elaboración, del tipo de resina, de las condiciones de curado, hasta incluso evaluar la posibilidad de introducir un pegamento adicional sobre la superficie del liner para evitar el despegue del laminado luego del curado.

6. AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Nacional de Energía Atómica por su interés en abordar temas no nucleares, al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas por su propuesta para realizar el trabajo en conjunto, a la empresa Kholenia por recurrir en busca de asesoramiento a los organismos de ciencia y técnica, ya que dicho planteamiento representó un desafío para los integrantes del Departamento de Ensayos No Destructivos y Estructurales de la CNEA y CONICET.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] BEESON, H. D., DAVIS, D. D., ROSS, W. L., TAPPHORN, R. M., "Composite Overwrapped Pressure Vessels", In: NASA/TP-2002-210769, National Aeronautics and Space Administration, Houston, Texas, 2002.
- [2] HILLGER W., BÜHLING L., ILSE D., "Air-coupled Ultrasonic Testing-Method, System and practical Applications", *11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014)*, October 6-10, 2014, Prague, Czech Republic.
- [3] FANG Y., LIN L., FENG H., LU Z., EMMS G. W., "Review of the use of air-coupled ultrasonic technologies for nondestructive testing of wood and wood products", *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 137, pp. 79-87, May 2017.
- [4] QUAEGBEUR N., MASSON P., BERRY A., ARDIN C., D'ANGLADE P-M., "Ultrasonic non-destructive testing of cardboard tubes using air-coupled transducers", *NDT & E International*, v. 93, pp. 18-23, January 2018.
- [5] GÓMEZ ÁLVAREZ-ARENAS, T.E., "Air-coupled Ultrasonic Transducers". In: Villamiel, M., Montilla, A., García - Pérez, J. V., Cárcel, J. A., Benedito, J. (eds), *Ultrasound in Food Processing: Recent Advances*, 1 ed, chap 7, United Kingdom, John Wiley & Sons Ltd, 2017.
- [6] BRIZUELA, J., CAMACHO, J., GOMEZ ÁLVAREZ-ARENAS, T. E., CRUZA, J., POODTS, E. "Air-coupled ultrasound inspection of complex aluminum-CFRP components," *IEEE International Ultrasonics Symposium IUS*, 16443599, Tours, France, 18 – 21 Sept. 2016.
- [7] LEENDERTZ, J. A., BUTTERS, J. N., "An image-shearing speckle-pattern interferometer for measuring bending moments", *Journal of Physics. E: Scientific Instruments*, v. 6, n. 1107, 1973.
- [8] TOH, S. L., CHAU, F. S., SHIM, V. P. W., TAY, C. J., SHANG, H. M., "Application of shearography in nondestructive testing of composite plates", *Journal of Material Processing Technology*, v. 23, pp. 267 – 275, 1990.
- [9] DE ANGELIS, G., MEO, M., ALMOND, D. P., PICKERING, S. G., ANGIANI, S. L., "A new technique to detect defect size and depth in composite structures using digital shearography and unconstrained optimization", *NDT & E International*, v. 45, pp.91-96, 2012.
- [10] LEE, J-R., MOLIMARD, J., VAUTRIN, A., SURREL, Y., "Application of grating shearography and speckle shearography to mechanical analysis of composite material, Composites, part A 35, pp. 965-976, 2004.
- [11] ETTEMEYER, A., "Laser shearography for inspection of pipelines", *Nuclear Engineering and Design*, v. 160, pp.237 – 240, Feb. 1996.
- [12] HUNG, Y.Y., CHEN, Y. S., NG, S. P., LIU, L., HUANG, Y. H., LUK, B. L., IP, R. W. L., WU, C. M. L., CHUNG, P. S., "Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation", *Material Science and Engineering R: Reports*, v. 64, n. 5-6, pp.73 – 112, May. 2009.
- [13] CORREA-ROJAS, N., CAUSADO-BUELVAS, J. D., HERRERA-CUARTAS, J. A., "Sistema De Shearografía para el Análisis Dinámico de Materiales bajo Estrés Térmico". *TecnoLógicas*, 2013, pp. 719-730, <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=344234341055>. Accedido en Julio de 2019.